

Европейский опыт утилизации сбросного энергопотенциала промышленных газов

Ни для кого не секрет, что Украина очень зависима от импорта первичных энергоносителей – природного газа, нефти, мазута. Между тем, огромное количество сбросного потенциала выбрасывается и загрязняет атмосферу. Это и шахтный газ, и метан, выделяющийся с мусорных свалок, а также ряд промышленных газов-отходов: коксовый, конверторный, доменный, ферросплавный газы, которые выделяются и зачастую бесполезно выбрасываются в процессе выплавки стали.

Следует отметить, что украинская законодательная база создает все условия для развития технологий по использованию этого потенциала. В первую очередь, это ратификация киотского протокола и создание механизма продажи сокращений выбросов парниковых газов, которых добился владелец проекта. А также целый ряд других законов и нормативных актов, в частности Закон «О комбинированном производстве тепловой и электрической энергии (когенерации) и использовании сбросного энергопотенциала», дающий определенные преференции таким технологиям.

Утилизация шахтного метана, газа мусорных свалок, продуктов пиролиза и ферментации органических отходов, а также коксового, ферросплавного, доменного и конверторного газов может приносить выгоду не только от экономии природного газа, но и благодаря возможности уменьшения расходов, связанных со штрафами по засорению окружающей среды и экономии выбросов CO₂.

Характерно, что в развитых европейских странах такие «бесполезные» газы, как конверторный, коксовый, ферросплавный, шахтный метан и газ мусорных свалок давно стали обычным топливом, на котором десятками лет вырабатывается электроэнергия, пар и горячая вода.

Одним из пионеров на поприще утилизации «сложных» газов считается компания Jenbacher. С 80-х годов она выпускает газопоршневые двигатели, предназначенные для работы на очень низкокалорийных газах-отходах технологических процессов, с теплотой сгорания менее 5% от теплоты сгорания природного газа. А в последнее время, по технологичности, надёжности и экологичности в лидеры вышла Немецкая компания 2G Energy.

Учитывая огромный «сбросной энергопотенциал», которым обладает Украина, зарубежный опыт его эффективной утилизации может оказаться полезным как владельцам этого ресурса, так и государству в целом за счет снижения энергетической и экономической зависимости от импортных энергоресурсов, а также улучшения экологической обстановки.

Резюме

Газопоршневые электростанции очень эффективны с точки зрения преобразования химической энергии топлива в полезную электрическую энергию. Современные газовые двигатели достигают электрического КПД более 44%, а в когенерационном цикле с утилизацией тепла выхлопных газов суммарный КПД составляет более 90%.

Низкий уровень эмиссий вредных веществ, высокая надежность и простота техобслуживания, маневренность и высокая энергетическая эффективность открыли широкие возможности применения газопоршневых электростанций для локальной генерации электрической и тепловой энергии.

Возможность сжигания широкого спектра газов, содержащих водород, позволяет производить дешевую электроэнергию и тепло из возобновляемых (пиролиз биомассы), а также из «бросовых» энергоресурсов (коксовый, доменный, ферросплавный газы, отходы

химических производств).

Однако утилизация этих «специальных» газов ставит перед производителями газопоршневых двигателей сложные задачи по адаптации конструкции двигателя и его системы управления к специфике сжигания такого рода топлив.

2G Energy имеет многолетний опыт промышленной эксплуатации двигателей, работающих на самом широком спектре «специальных» водородосодержащих газов:

- на чистом водороде H_2 - с чрезвычайно низкой детонационной стойкостью – метановое число $MZ=0$;
- на крайне низкокалорийных газах (H_2 16%, N_2 76%), с теплотой сгорания 398 ккал/м³ - всего 4.9% от теплоты сгорания природного газа;
- с содержанием $CO > 80\%$ (очень низкая скорость распространения пламени и низкая теплота сгорания, крайне токсичен).

Основы сжигания газов в газопоршневых двигателях

На данный момент большая часть газопоршневых двигателей работает на природном газе, однако с каждым годом все больше двигателей продается для работы на возобновляемых топливах, таких как пиролизный газ, биогазы и пр. Доля таких двигателей в объеме продаж превышает 35%.

В таблице №1 приведены основные характеристики газов, важные с точки зрения их утилизации в газопоршневых двигателях.

Таблица №1. Состав и свойства некоторых газов

Газ	Состав	Плотность, кг/м ³	Низшая теплота сгорания, ккал/м ³	Метановое число	Ламинарная скорость пламени, см/с
Водород	H_2	0.0899	2 575.8	0	302
Метан	CH_4	0.717	8 572.2	100	41
Окись углерода	CO	1.250	3 019.0	75	24
Природный газ (пример)	$CH_4 = 88.5\%$, $C_2H_6 = 4.7\%$, $C_3H_8 = 1.6\%$, $C_4H_{10} = 0.2\%$, $N_2 = 5\%$	0.798	8 717.9	80	41
Биогаз (пример)	$CH_4 = 65\%$, $CO_2 = 35\%$	1.158	4 717.9	135	27
Продукты пиролиза древесины	$H_2 = 7\%$, $CO = 7\%$, $C_xH_y = 5\%$,	1.258	1 187.1		15

Низшая теплота сгорания (LHV) и высшая теплота сгорания (HHV)

Бутан		25 800
Пропан		17 200
Попутный нефтяной газ		12 900
Природный газ		8 600
Газ сточных вод Биогаз		
Газ мусорных свалок		4 300
Коксовый газ		
Шахтный газ		
Водород Пиролизный газ		

Рисунок №1. Низшая теплота сгорания некоторых газов, ккал/нм³

Теплота сгорания отражает содержание энергии в единице объема газа при нормальных условиях. Низшая теплота сгорания не учитывает тепло, которое выделяется при конденсации водяных паров в продуктах сгорания. Если охладить продукты сгорания ниже температуры конденсации водяных паров (для природного газа около 40°C, зависит от коэффициента избытка воздуха λ), в процессе конденсации водяных паров выделится дополнительное тепло (для природного газа около 9% от низшей теплоты сгорания).

Традиционно в теплотехнических расчетах используется низшая теплота сгорания, в результате при глубоком охлаждении продуктов сгорания КПД (точнее КИТ – коэффициент использования топлива) может превышать 100%.

На рисунке №1 показана логарифмическая шкала низшей теплоты сгорания различных газов, которые уже используются в качестве топлива для газопоршневых двигателей 2G Energy. Как видно, соотношение теплоты сгорания самого низкокалорийного газа (смесь водорода 16% и азота 76%, 398 ккал/нм³) и высококалорийного (бутан, 28 345 ккал/нм³) - более чем в 70 раз.

Теплота сгорания газа не дает ответа на вопрос о возможности использования того или иного газа в качестве топлива для двигателя. С ее помощью определяется объемный расход топлива и воздуха, и по этим данным рассчитываются диаметры топливного и воздушного тракта, подбирается турбокомпрессор, интеркулер, газосмеситель (карбюратор).

Ниже будет показано, почему в некоторых случаях единичная мощность и КПД двигателя при работе на крайне низкокалорийной смеси водорода и азота оказывается значительно выше, чем при работе на высококалорийном бутане.

Метановое число (MZ)

Это параметр характеризует детонационную стойкость газообразного топлива. Метановое число аналогично октановому числу для бензина, и равно процентному

отношению метана в метано-водородной смеси, которая имеет такую же детонационную стойкость в тестовом двигателе, как и испытываемый газ. Например, если природный газ имеет метановое число 90, это означает, что он имеет такую же детонационную стойкость, как и смесь из 90% метана и 10% водорода.

На рисунке №2 показано метановое число для различных газов, используемых в качестве топлива для газопоршневых двигателей.

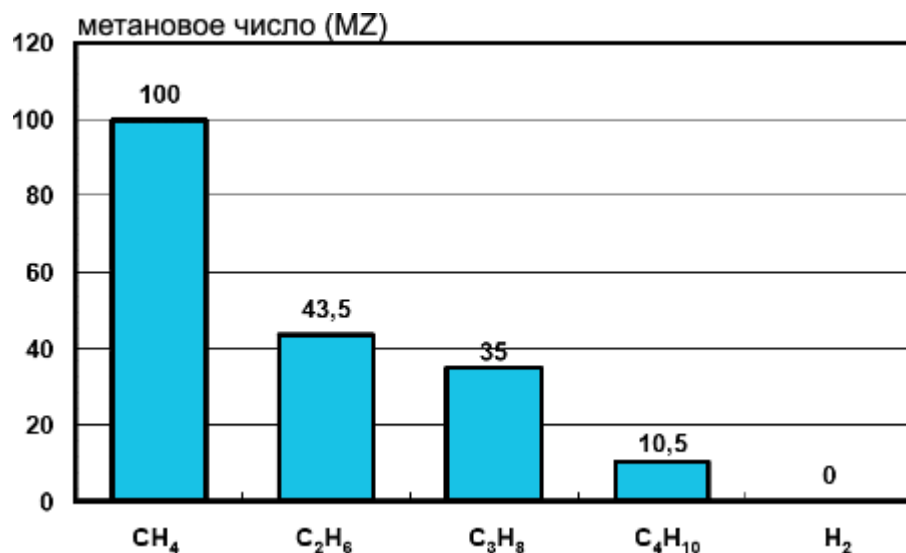


Рисунок №2. Метановое число некоторых газов

Высокая детонационная стойкость позволяет повышать степень сжатия (и/или давление наддува), что напрямую сказывается на повышении КПД (и/или удельной мощности) двигателя.

Ламинарная скорость распространения пламени

Ламинарная скорость распространения пламени - это скорость, с которой происходит окисление (горение) горючих компонентов топлива по фронту (поверхности) распространения пламени. Ламинарная скорость пламени очень сильно зависит от коэффициента избытка воздуха (лямбда), и достигает максимума в районе $\lambda = 1$. Коэффициент избытка воздуха (λ , лямбда) равен отношению действительного количества воздуха в камере сгорания к т.н. стехиометрическому, или минимально необходимому количеству воздуха для полного сгорания топлива. При $\lambda > 1$ газоздушная смесь считается бедной (избыток воздуха), при $\lambda < 1$ смесь переобогащенная – недостаток воздуха, неполное сгорание.

На рисунке №3 показана скорость распространения пламени для природного газа, водорода, коксового газа, а также продуктов пиролиза биомассы и древесины. Как видно из рисунка, скорость пламени очень сильно зависит от избытка воздуха в камере сгорания. Помимо этого, наличие в топливе инертных газов, таких как азот (N₂), углекислый газ (CO₂) способно существенно снизить скорость горения газоздушной смеси.

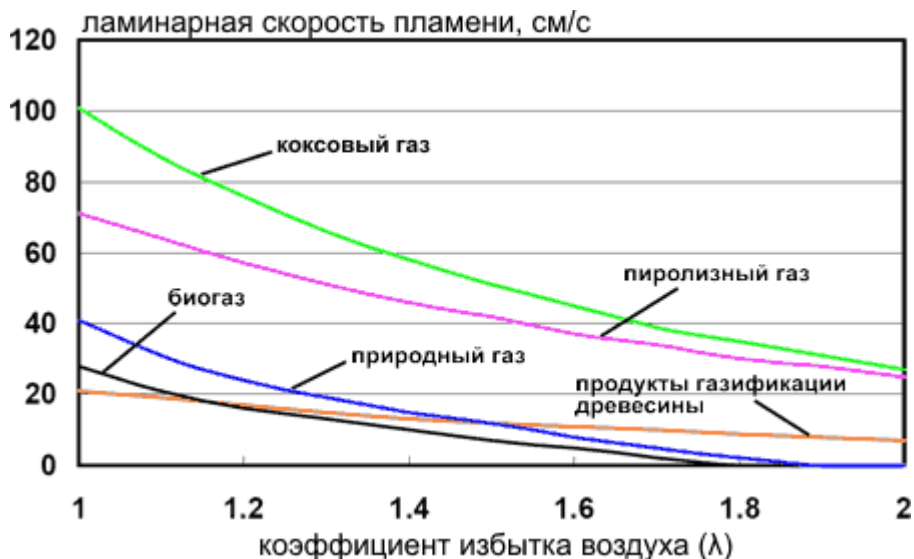


Рисунок №3. ламинарная скорость пламени некоторых газов

Следует отметить, что ламинарная скорость пламени дает лишь первое представление о возможности сжигания того или иного газа в газопоршневом двигателе, поскольку процесс сгорания смеси в реальном двигателе очень турбулизирован.

Для двигателей с искровым зажиганием критической зоной, за которой смесь перестает воспламеняться, является ламинарная скоростью пламени ниже 4÷5 см/сек.

На рисунке №4 показан диапазон воспламеняемости смеси горючего газа и воздуха для некоторых горючих газов.

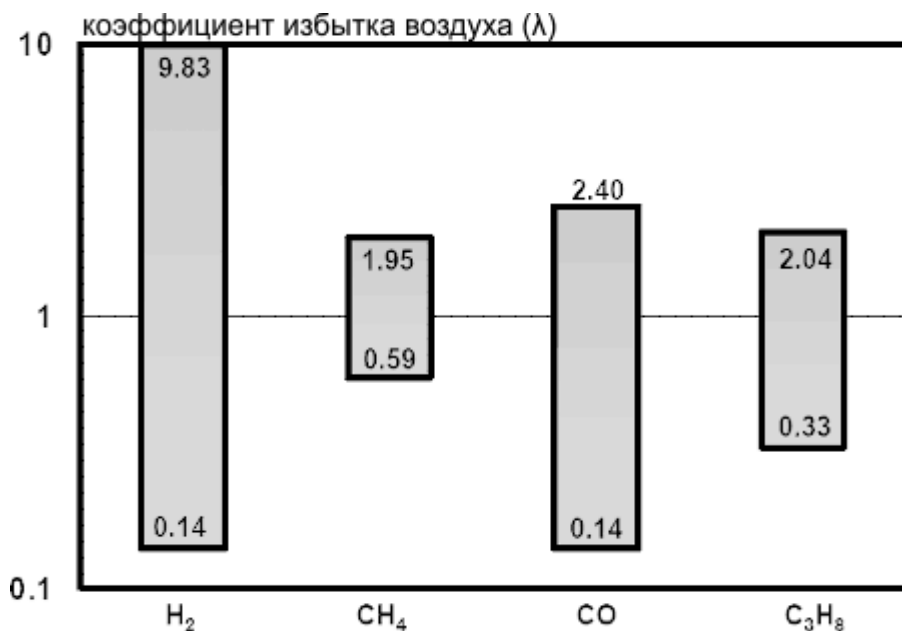


Рисунок №4. Диапазон воспламеняемости смесей горючих газов с воздухом

Благодаря высокой скорости распространения пламени (рисунок №3), «окно» воспламеняемости смеси водорода с воздухом очень широкое, особенно по сравнению с метаном. Окись углерода (угарный газ CO) в этом плане также значительно менее требовательное топливо к качеству газозоудушной смеси, чем метан. Это очень

полезное качество водорода (H_2) и окиси углерода (CO) позволяет сжигать в газопоршневом двигателе очень низкокалорийные газы с высокой эффективностью.

Пределы воспламеняемости топлива

Как было показано выше, основным ограничением по использованию газа в качестве топлива для газопоршневого двигателя является ламинарная скорость распространения пламени, которая зависит от свойств горючего газа и доли инертных (балластных) компонентов в газозоудшной смеси.

На рисунке №5 показаны предельные соотношения горючих и инертных газов в топливе, которые определяют границу его воспламеняемости (по минимальной скорости распространения пламени). Такое распределение наглядно показывает, что сама по себе теплота сгорания практически не дает информации о возможности применения того или иного газа в газопоршневом двигателе.

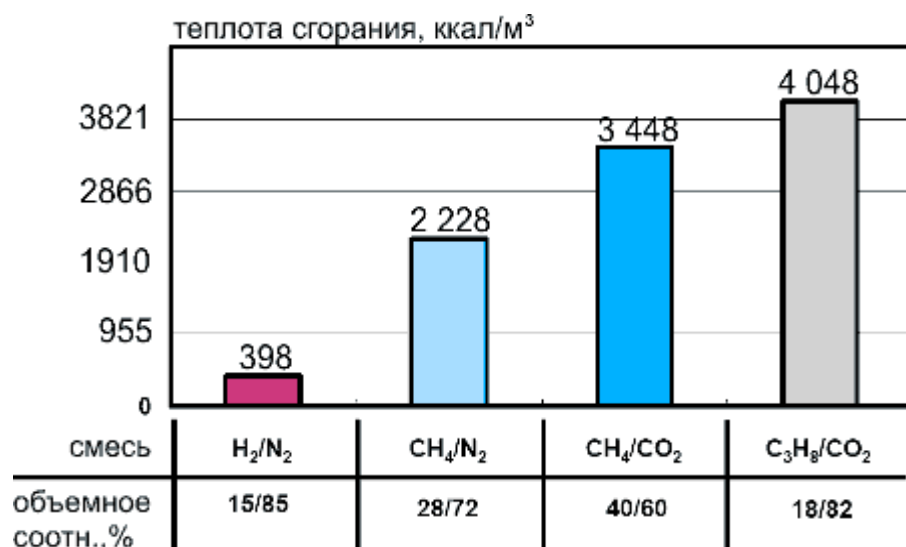


Рисунок №5. Предельные концентрации инертных и горючих газов в топливе

Если газозоудшная смесь близка к границе воспламеняемости из-за низкой скорости пламени (4-5 см/с), эта граница может быть несколько расширена за счет улучшения условий зажигания смеси.

Во-первых, эта зона может быть расширена за счет применения форкамерного зажигания смеси, лазерного зажигания (сейчас находится в стадии полевых испытаний) либо за счет впрыскивания запальной дозы дизельного топлива и воспламенения смеси от сжатия. Однако из-за резкого ухудшения экологических характеристик двигателей с воспламенением смеси запальной дозой дизельного топлива (увеличение выбросов NO_x , повышение зольности выхлопа, загрязнение золой теплообменника выхлопного газа), а также усложнения топливного тракта, такая концепция компанией 2G Energy не применяется.

Во-вторых, повышение температуры газозоудшной смеси (за счет увеличения компрессии/давления наддува, либо внешнего подогрева смеси) существенно облегчает зажигание топлива и расширяет пределы воспламеняемости смеси. Рисунок №6 отражает эту зависимость для некоторых топлив, в частности для метана максимальный коэффициент избытка воздуха $\lambda=1,85$ при 20°C увеличивается до $\lambda=3,0$ при температуре смеси 330°C.

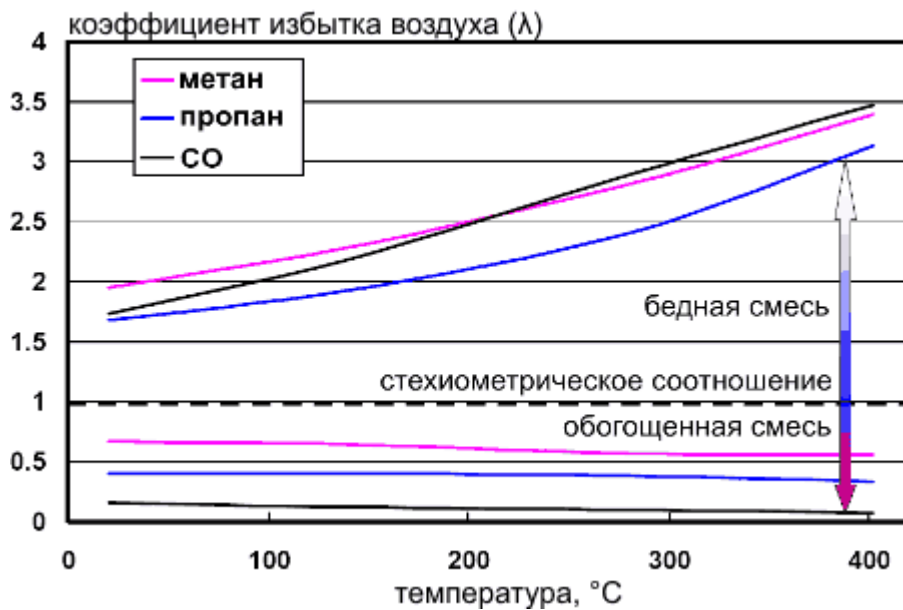


Рисунок №6. Расширение границы воспламеняемости смеси при росте температуры

Однако увеличение температуры газозвушной смеси ограничено другими критическими лимитами, с одной стороны повышается риск детонационного сгорания, с другой стороны возможно самовоспламенение смеси от сжатия.

Температуры самовоспламенения некоторых газов показаны на рисунке №7.

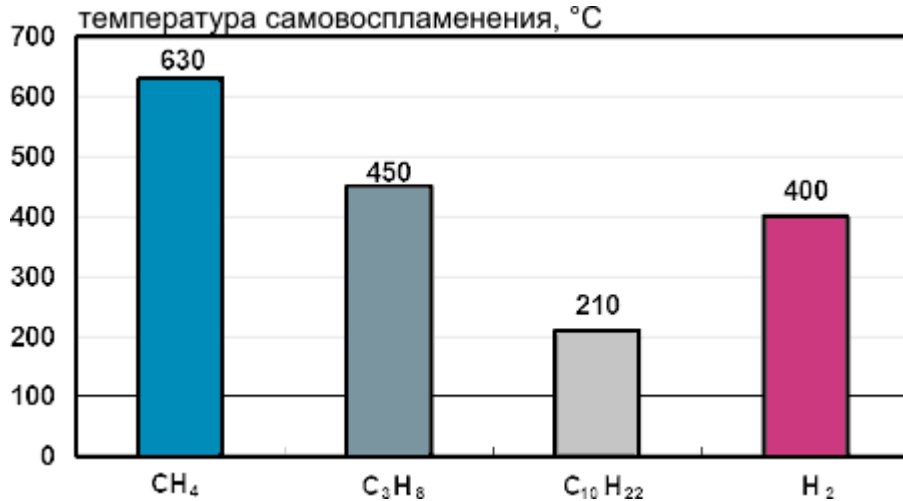


Рисунок №7. Температура самовоспламенения некоторых газов

Под детонационным сгоранием подразумевается спонтанное возникновение очагов горения впереди основного фронта пламени. Такие очаги возникают уже после воспламенения смеси свечей зажигания, когда происходит резкое повышение температуры и давления в камере сгорания; индикаторная диаграмма двигателя с детонацией показана на рис.№8.

Детонационное сгорание сопровождается резким увеличением скорости горения смеси и, как следствие, скачкообразным повышением давления в цилиндре (в 2÷4 раза). Детонация возникает из-за несоответствия детонационной стойкости газа (метанового числа) и степени сжатия (а также температуры и давления наддува смеси).

Помимо этого, детонацию может вызвать обогащение смеси, слишком раннее зажигание, наличие нагара в камере сгорания (способствует возникновению очагов самовоспламенения смеси), перегрев газовой смеси, перегрузка двигателя (высокое давление).



Рисунок №8. Давление в цилиндре при нормальном и детонационном сгорании

С детонацией борются путем: понижения температуры газовой смеси, уменьшением степени сжатия (и/или давления наддува газовой смеси), оптимизацией геометрии камеры сгорания и формы поршня (а также условий их охлаждения), уменьшением единичного объема цилиндров, увеличением оборотов двигателя, работой на более бедной смеси, смещением на более поздний угол опережения зажигания (относительно наивыгоднейшего).

Обеспечение низких уровней эмиссий вредных веществ

Со временем все жестче становятся государственное регулирование касательно ограничения уровня вредных выбросов в Европе, аналогичных тенденций следует ожидать в самое ближайшее будущее и в Украине. В данный момент в Украине для стационарных газопоршневых (и дизельных) двигателей нет ограничений по максимальному количеству вредных веществ в выхлопных газах. Вместо этого регламентируется уровень концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы; соответственно, чем больше вредных веществ выбрасывает двигатель, и чем выше существующая их концентрация, тем выше должны быть дымовые трубы. В Германии и некоторых других европейских странах действует стандарт TA-LUFT, который регламентирует выбросы от стационарных газопоршневых двигателей на уровне: $NO_x < 500 \text{ мг/нм}^3$, $CO < 650 \text{ мг/нм}^3$, $NMHC < 150 \text{ мг/нм}^3$ (все при 5% O_2 в выхлопных газах). В ближайшем будущем запланирован переход на уровень $\frac{1}{2}$ TA-LUFT (50% от уровня выбросов TA-LUFT). В любом случае, ужесточение экологических норм – событие неотвратимое, и следует быть к этому готовым уже на этапе проектирования электростанции.

На рисунке №9 показана зависимость уровня выбросов вредных веществ от коэффициента избытка воздуха для газопоршневого двигателя, работающего на природном газе и без применения дополнительных методов очистки выхлопных газов.

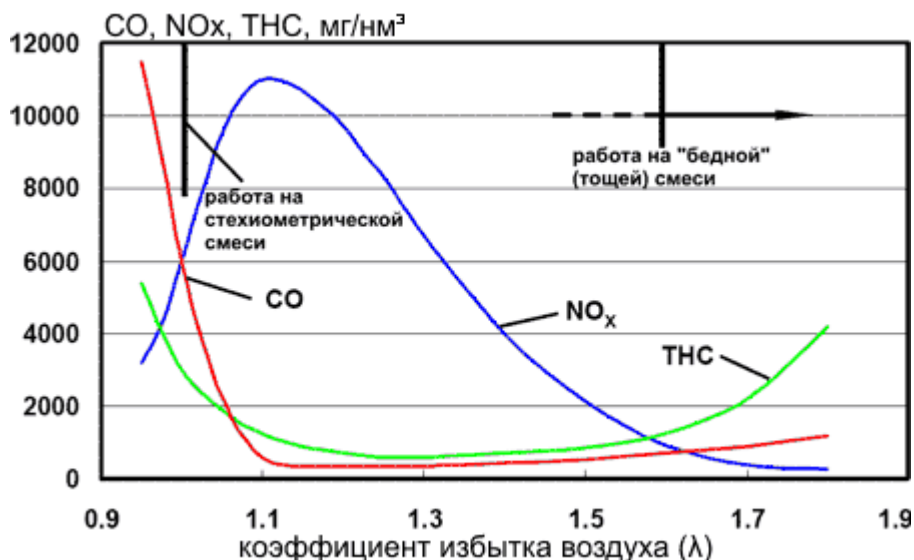


Рисунок №9. Зависимость уровня выбросов вредных веществ от коэффициента избытка воздуха

Как известно, окислы азота (NO_x) образуются в камере сгорания только при высокой температуре из-за окисления азота, содержащегося в воздухе. С увеличением коэффициента избытка воздуха (λ) температура в камере сгорания снижается благодаря разбавлению продуктов сгорания воздухом, который не принимает участия в горении, таким образом, существенно уменьшается количество NO_x в выхлопных газах. Однако, как видно из рис.10, с увеличением λ постепенно увеличивается химический недожог топлива, что сопровождается ростом CO и NMHC (не метановые углеводороды) в продуктах сгорания.

Современные когенерационные двигатели при работе на природном газе позволяют обеспечить уровень выбросов NO_x < 250 мг/нм³ (1/2 TA-LUFT) только за счет работы на бедной смеси (λ = 1.6 ÷ 1.8), а уровень CO < 300 за счет применения окислительного каталитического катализатора (относительно дешевого и не требующего обслуживания). Дальнейшее снижение образования NO_x внутри камеры сгорания путем увеличения λ ограничивается тем, что скорость пламени становится слишком низкой и достигается предел воспламеняемости смеси (хотя в некоторых случаях он может быть расширен, как указывалось выше). Тем не менее, возможна установка внешних катализаторов, которые позволяют дополнительно снизить уровень выбросов NO_x до 10 ÷ 30 ppт путем «промывки» выхлопных газов раствором мочевины, который поглощает окислы азота. Такая глубокая очистка позволяет направлять выхлопные газы в теплицы для удобрения растений углекислым газом (в т.ч. где предусмотрено нахождение персонала), однако такие катализаторы достаточно дорогостоящие и требуют постоянного пополнения реагента.

Если рассматривать специальные газы, содержащие в качестве горючих компонентов CO и, особенно, H₂ с точки зрения образования выбросов NO_x, есть принципиальные отличия от работы на природном газе. В одном и том же двигателе, при прочих равных условиях (степень сжатия, угол опережения зажигания, коэффициент избытка воздуха, давление наддува) температура выхлопных газов при работе на водороде будет на порядок выше, чем в случае природного газа. Соответственно, это создает предпосылки к образованию большего количества NO_x в выхлопных газах.

Однако здесь вмешиваются и другие факторы. Выше было отмечено, что благодаря высокой скорости распространения пламени, угарный газ (CO), а особенно водород (H₂) позволяет работать на крайне бедной смеси с очень большим коэффициентом избытка воздуха (до λ = 9.8 в случае водородо-воздушной смеси).

Благодаря наличию в камере сгорания большого количества воздуха, не принимающего участия в сгорании топлива, достигается значительное снижение температуры выхлопных газов и невероятно низкий уровень выбросов NOx – менее 5 мг/нм³ или 2 ppm, что практически приближается к пределу выявления. Как видно из рисунка №4, такой коэффициент избытка воздуха (для водорода $\lambda = 9.8$) недостижим при работе на природном газе. Рисунок №10 наглядно показывает потенциал различных газов с точки зрения возможности уменьшения выбросов NOx.

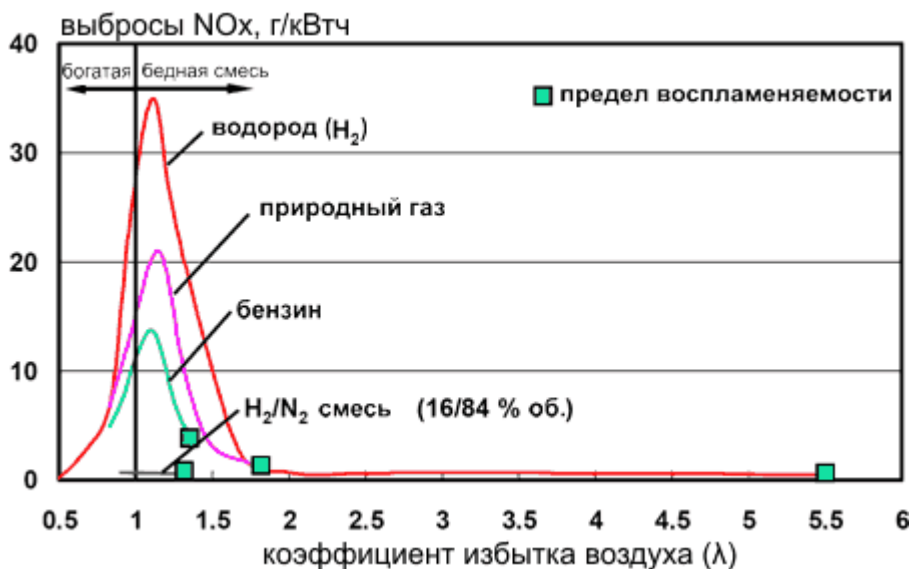


Рисунок №10. Потенциал снижения выбросов NOx для некоторых газов

Первые разработки 2G Energy в создании серийных стационарных двигателей для работы на водороде и водородосодержащих газах.

Серийное производство газопоршневых двигателей, предназначенных для работы на водороде, началось в 1990-х годах. Первым таким проектом стал инновационный проект утилизации энергии ветра совместно с фирмой P&T Technology.

Ветроэлектростанция обеспечивала потребителей в островном режиме (без внешней сети), при этом избыточная электроэнергия направлялась в электролизер, где происходило разложение воды на водород и кислород. Собранный чистый водород хранился под давлением 30 МПа, и использовался в качестве топлива для двигателей 2G Energy, которые покрывали пиковые нагрузки, а также базовую нагрузку в период отсутствия ветра.

Сравнение показателей газопоршневого двигателя при работе на водороде и природном газе.

Проект P&T стал серьезным вызовом для инженеров-конструкторов, поскольку это был первый проект промышленной эксплуатации стационарных двигателей на водороде, имеющем очень существенные отличия от свойств природного газа. Результаты эксплуатации первых двигателей даже превзошли ожидания конструкторов.

Водород оказался очень удачным топливом с точки зрения его утилизации в газопоршневых двигателях, так как позволял работать на очень бедной смеси, а высокая ламинарная скорость пламени позволяла добиваться и большей электрической (механической) эффективности, чем при работе на природном газе. На рисунке №11 показаны характеристики двигателей проекта P&T при работе на чистом водороде ($NOx < 2$ мг/нм³ или < 5 ppm), а также на природном газе с выбросами NOx на уровне TA-LUFT ($NOx < 500$ мг/нм³) и $\frac{1}{2}$ TA-LUFT ($NOx < 250$ мг/нм³).

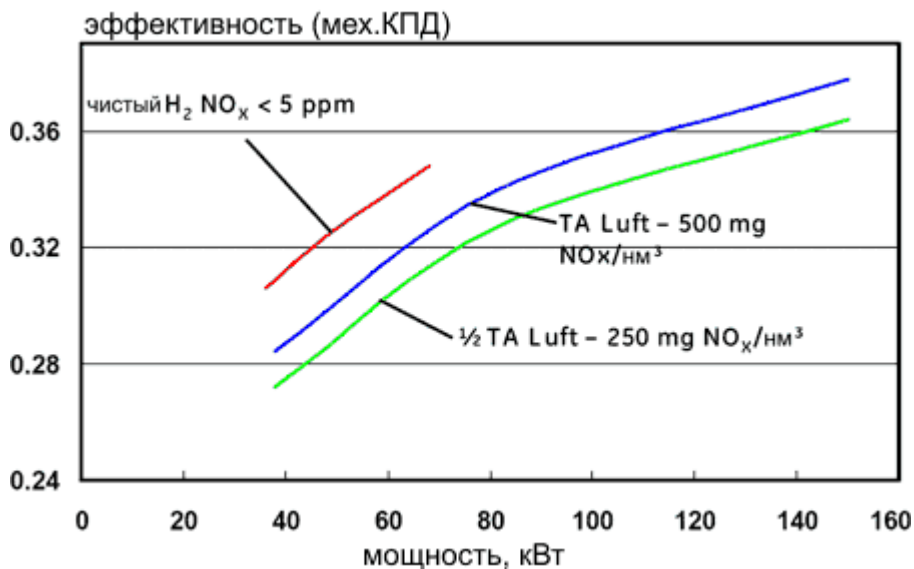


Рисунок №11. КПД и мощность газопоршневого двигателя на водороде и природном газе

При работе на природном газе ($NO_x < 250$ мг/нм³) коэффициент избытка воздуха λ составлял $\lambda = 1.62$ (температура выхлопных газов 530°C), а при работе на водороде $\lambda = 2.58$ (температура выхлопных газов 395°C).

Помимо того, что двигатели при работе на водороде показали более высокий индикаторный КПД (благодаря более высокой скорости пламени), так еще и благодаря низкой температуре в камере сгорания уровень выбросов NO_x оказался чрезвычайно низким (менее 2 мг/нм³ при 5% O_2). Это позволяет практически говорить о нулевых выбросах вредных веществ (выбросы CO и $NMHC$ при работе на водороде отсутствуют, так как нет углерода в топливе).

Однако из-за отсутствия турбокомпрессоров, двигатель при работе на водороде смог развить лишь 1/3 от мощности, которую он развивал на природном газе. (из-за низкой теплоты сгорания водорода и больших объемов газозвушной смеси).

Дальнейшие разработки были нацелены на оптимизацию работы турбокомпрессора для повышения мощности, а также на адаптацию двигателей для работы на широком спектре промышленных газов с содержанием водорода (которые зачастую выбрасывались как бесполезные).

Рисунок №12 отражает достигнутые на сегодня уровни выбросов NO_x у двигателей 2G Energy при их работе на пиролизном, коксовом, ферросплавном и других водородосодержащих газах.

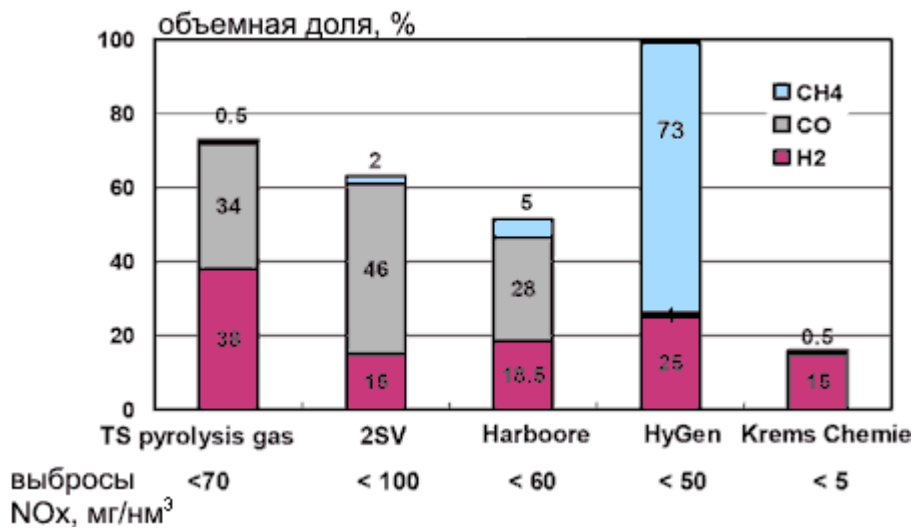


Рисунок №12. Достигнутые уровни выбросов NOx при работе на разных газах

Первый столбец отражает выбросы NOx при работе газопоршневых установок на пиролизном газе (газификация отходов). В данном применении среднее эффективное давление в цилиндре принято ВМЕР=1.0 МПа. В принципе, возможно снижение выбросов NOx и ниже 70 мг/нм³ путем дальнейшего обеднения смеси, однако это приведет к снижению мощности двигателя и ухудшению общих экономических показателей станции.

Например, на объекте Harboore (пиролиз древесных отходов) возможно обеспечение выбросов NOx ниже 60 мг/нм³ (при ВМЕР=1.0МПа), однако с целью увеличения экономической эффективности на данный момент газопоршневые двигатели работают с ВМЕР=1.3 и выбросами NOx<450 мг/нм³. Как было показано выше, увеличение коэффициента избытка воздуха снижает скорость сгорания смеси, что прямо сказывается на электрической эффективности, - детальнее см. в статье о увеличении эффективности газовых двигателей.

Экстремально низкие выбросы NOx достигаются и на заводе Krems Chemie, где газовые двигатели работают на газе, содержащем всего 16% H₂ и 84% N₂; этот газ – побочный продукт производства формальдегида.

Существует также газ под брэндом «HyGen», являющий собой смесь метана и водорода. На основании опыта 2G Energy можно утверждать, что целесообразно применять смесь водорода с метаном с долей H₂ от 15% (энергетических) с целью снижения выбросов NOx до уровня ниже 50 мг/нм³. Более низкое содержание водорода не ускоряет скорость сгорания смеси, а это не позволяет работать с высоким коэффициентом избытка воздуха. На рисунке №13 показано, как содержание водорода в метане увеличивает скорость сгорания и таким образом расширяет «окно» воспламеняемости смеси.

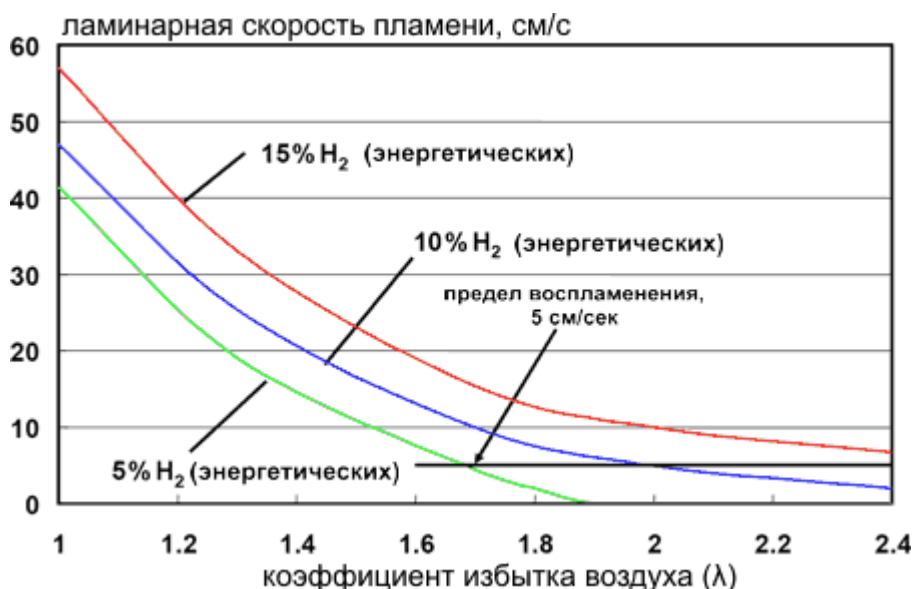


Рисунок №13. Увеличение скорости сгорания природного газа путем подмешивания водорода

При содержании водорода H₂ в смеси с метаном до 5%, скорость сгорания не увеличивается вовсе, при содержании H₂ = 10% (энергетических) коэффициент λ может быть расширен до 2, и лишь при содержании H₂ > 10% можно достичь крайне низких показателей выбросов NO_x.

Газосмеситель, турбонаддув и мощность двигателей при работе на водороде и водородных смесях

Работа на специальных низкокалорийных газах требует специальной адаптации газосмесителя (карбюратора), а также турбоагнетателя и системы управления двигателя.

На рисунке №14 показано сравнение качества топливо-воздушной смеси для природного газа и для низкокалорийного газа завода Krems Chemie (15%H₂ и 85%N₂):

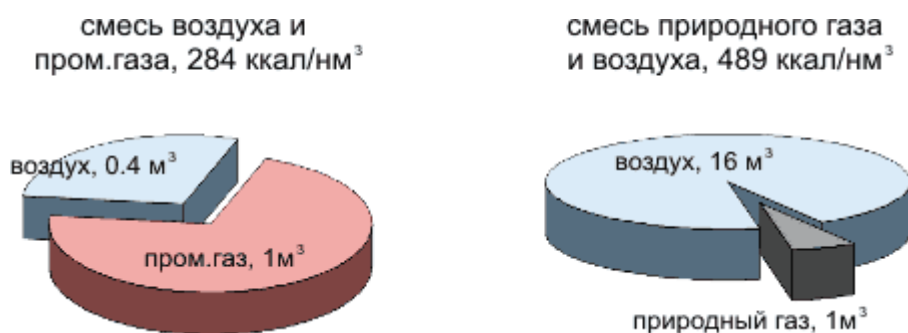


Рисунок №14. Состав и теплота сгорания газо-воздушной смеси разных топлив

В ситуации со сжиганием низкокалорийного газа завода Krems Chemie, вместо подмешивания топлива в поток воздуха (как в случае природного газа) можно говорить уже о подмешивании воздуха (40% объема смеси) в поток низкокалорийного газа.

Ввиду более низкой теплотворной способности газо-воздушной смеси в камере сгорания, приходится прокачивать больший объем газа в двигатель для достижения той же мощности, что в свою очередь требует адаптации турбокомпрессора.

Так, для достижения среднего эффективного давления в цилиндре (BMEP) 1 МПа на газе Krems Chemie турбокомпрессору необходимо обеспечить давление наддува газозоудной смеси 350 кПа, в то время как при работе на природном газе достаточно 180 кПа. Помимо необходимости обеспечить большую производительность турбокомпрессора, ситуация осложняется еще и более низкой температурой выхлопных газов на входе в турбокомпрессор из-за наличия большого количества инертного азота (N₂) в низкокалорийном топливе завода Krems Chemie. Так, температура в камере сгорания и на входе в турбокомпрессор для этого газа на 200°C ниже, чем в случае работы на природном газе. Это существенно снижает располагаемую энергию на входе в турбокомпрессор, хотя с другой стороны радикально снижает образование выбросов NO_x (до уровня 2 мг/м³).

Таким образом, при утилизации водородо-содержащих низкокалорийных газов так или иначе возникает проблема дефицита располагаемой мощности турбокомпрессора (возможны исключения, если в топливе содержится кислород; так, даже при концентрации метана ниже 25% в шахтном газе не происходит ни снижения мощности ни КПД двигателя именно благодаря наличию кислорода в этом газе. Чем больше коэффициент избытка воздуха, чем ниже теплота сгорания топлива, тем большая нагрузка ложится на турбокомпрессор; и наступает момент, когда необходимо либо снизить мощность двигателя (турбокомпрессор не обеспечивает необходимого давления наддува), либо сделать смесь более богатой. Однако степень «обогащения» смеси также ограничена: возникновением риска детонации, риска обратной вспышки во впускной тракт, риска самовоспламенения смеси из-за высокой температуры в камере сгорания, а также повышением температурного напряжения в камере сгорания.

По согласованию с заказчиком двигателя могут быть адаптированы на несколько режимов работы, и персонал станции по своему усмотрению выбирает тот режим, который наиболее оптимален. Например, на объекте Harboore (пиролизный газ, 18%Н₂, 28%СО, 4%СН₄) возможен режим работы на максимально бедной смеси с пониженной мощностью и КПД (BMEP=1.1, P=650 кВтэл) с выбросами NO_x<70 мг/м³, либо на более богатой смеси (BMEP=1.3, P=765 кВтэл) с более высокой электрической мощностью и КПД, но при этом выбросы возрастают до NO_x<450 мг/м³ (детальной см. ниже). Также возможна работа на нескольких газах и их смеси – например пиролизном и природном газе (объект Chiba, см.ниже).

Адаптация системы управления двигателя

Система управления качеством смеси (соотношения газ/воздух, а также давление наддува), которая применяется в двигателях 2G Energy. Её отличительной чертой является то, что в качестве исходных данных используются легко и точно измеряемые величины: мгновенная электрическая мощность генератора, а также температура и давление наддува (газоозоудной смеси во впускном коллекторе). На основании только этих данных система автоматики управляет газосмесителем (регулировка соотношения газ/воздух), а также дроссельной заслонкой и турбобайпасом (давление наддува). Алгоритм работы системы автоматики позволяет выдерживать необходимое соотношение газ/воздух на любых режимах работы, а также реагировать на изменение теплотворной способности газа.

Однако работа на особых низкокалорийных газах имеет свою отличительную специфику. Пиролизный, коксовый, ферросплавный и другие промышленные газы не могут быть накоплены в резервуарах, поэтому сразу же направляются на вход топливного тракта газопоршневого двигателя. Однако технология получения этих газов такова, что их состав может очень быстро изменяться.

Например, на станции пиролиза бытовых отходов Fondotose содержание Н₂ может изменяться от 15 до 46% в течении 7 минут (в момент загрузки новой партии отходов).

Если такое изменение происходит при работающем двигателе, система автоматики отслеживает уменьшение теплотворной способности газа и автоматически управляет газосмесителем для поддержания постоянного состава газозвоздушной смеси. Упрощенный алгоритм работы системы автоматики следующий: при первичной наладке задается опорная линия, которая отражает соответствие давление наддува смеси электрической мощности при постоянном коэффициенте избытка воздуха лямбда. Если в момент работы произошло уменьшение концентрации H_2 , т.е. теплотворной способности газа, мгновенно уменьшится электрическая мощность генератора. Система автоматики даст команду закрыться быстродействующему байпасу турбокомпрессора – увеличится давление наддува – увеличится электрическая мощность. Однако теперь этой мощности будет соответствовать более высокое давление смеси, чем опорное (заданное при наладке), следовательно автоматика «делает вывод», что смесь слишком бедная и дает команду газосмесителю (на порядок более инерционному) приоткрыть топливный тракт (и обогатить смесь, вернувшись к заданному λ). Таким образом, достигается очень динамичная и точная адаптация двигателя к изменению качества топливного газа.

При работе на природном газе, где теплотворная способность меняется в незначительных пределах, при запуске двигателя положение газосмесителя выставляется «вслепую» по заложенным в память данным о качестве газа.

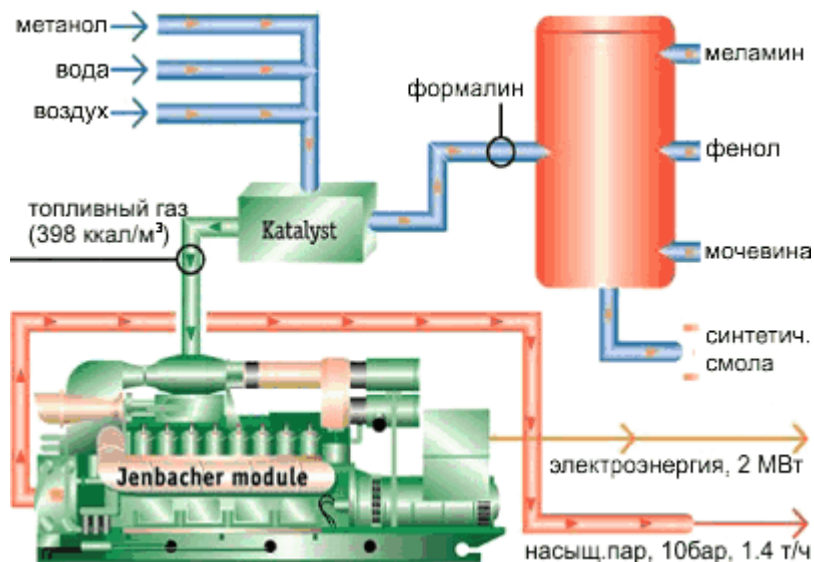
Однако, если в момент запуска концентрация метана, либо другого горючего компонента изменится от расчетной, то приготовленная газозвоздушная смесь может оказаться либо слишком бедной, либо слишком богатой, и двигатель не запустится. Особенно опасен последний случай, так как несгоревшая газозвоздушная смесь попадает в выхлопной тракт и может взорваться; также существует опасность обратного хлопка. Поэтому, при работе на топливе, для которого характерны существенные колебания теплотворной способности, для возможности уверенного и безопасного запуска двигателей устанавливается датчик концентрации метана (водорода), и на основании его показаний выставляется положение газосмесителя в момент запуска двигателя (в дальнейшем его показания не используются).

Еще одной опасностью при работе на сложных газах может оказаться такие изменения пропорций различных компонентов (например одновременное изменение пропорций CO , H_2 , CH_4 , и N_2), которые могут привести к приближению к границе детонационного сгорания, либо наоборот к пропускам зажигания. И хотя система регулирования по-прежнему будет успешно справляться с управлением выходной мощностью, возникает необходимость в постоянном мониторинге концентрации H_2 для определения приближения к границе детонационного сгорания (богатая смесь) либо пропуска зажигания (бедная смесь).

ОТРАСЛИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СО СБРОСОВЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ, И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ GE JENBACHER

Газы-отходы химической промышленности: завод Krems-Chemie, Австрия

Формальдегид необходим для производства синтетической смолы, которая применяется в деревообработке, целлюлозно-бумажной промышленности, при производстве резинотехнических изделий. Как суб-продукт производства формальдегида, образуется около 12 тыс. м³/ч низкокалорийного газа (18% H_2 и 82% N_2). Этот газ сжигается в газопоршневых двигателях GE Jenbacher, которые вырабатывают 2.3 МВт электрической энергии, а также пар для технологических нужд. Схема процесса изображена на рисунке №15, а машинный зал с газопоршневыми установками на рисунке №16.



**Krems-Chemie,
Австрия**

Состав газа:

H_2	16÷21%
CH_4	1.5%
CO	1.5%
CO_2	5%
N_2	71÷76%
LHV	398÷525 ккал/нм³

Рисунок №15. Схема производства синтетической смолы на заводе Krems-Chemie



**Krems-Chemie,
Австрия**

4xJGS-320 GS S.L

**Электрич. мощность:
4 x 588 кВт**

**Тепловая мощность:
1.4 т/ч нас.пара, 10 бар**

**Ввод в эксплуатацию:
май 1996 года**

**Наработка на 12/2004:
более 70 000 р.ч.
(каждым модулем)**

Рисунок №16. Машинный зал электростанции завода Krems-Chemie

В начале 90-х компания Krems-Chemie начала поиск возможности полезного использования этого низкокалорийного побочного газа. Поскольку ни один производитель газопоршневых двигателей не давал гарантий того, что их двигатели смогут работать на таком газе, компания решила установить паровой котел и вырабатывать на этом газе пар для паровой турбины. Непосредственно перед началом реализации этой концепции компания обратилась также на завод GE Jenbacher для консультаций. Базируясь на опыте работы на водородосодержащих газах, завод GE Jenbacher предоставил специальное решение для работы на этом газе. На порядок более высокий электрический КПД, большая электрическая мощность и на 20% ниже капитальные затраты у газопоршневых установок по сравнению с паровым котлом и турбиной позволили сократить срок окупаемости с 3 до 2-х лет, что и стало причиной выбора концепции утилизации газа в газопоршневых двигателях.

Инсталляция была завершена в мае 1996 года, и с этого времени 4 модуля JGS 320 GS S.LC производят 2,3 МВтэл электрической энергии (4 x 588 кВт), а также 1,4 т/ч насыщенного пара (давление 11.5 бар, 186°C) . Помимо этого, горячая вода рубашки

охлаждения используется для подогрева питательной воды для паровых котлов, работающих на этом же низкокалорийном газе.

Благодаря эксплуатации когенерационных модулей, завод *Krems-Chemie* сократил на 75% объемы покупки электроэнергии из сети. Помимо этого, эксплуатация газопоршневых двигателей приносит огромный плюс для окружающей среды, поскольку замещает производство электроэнергии и тепла на экологически «грязных» электростанциях. При работе на таком специфическом газе, выбросы парниковых газов (CO_2) минимальны, поскольку основной горючий компонент водород. Выбросы окислов азота NO_x благодаря работе на очень бедной смеси также очень низкие: до 10 мг/нм^3 (действующие нормы *TA-LUFT* ограничивают $\text{NO}_x < 500 \text{ мг/нм}^3$). С момента пуска-наладки в мае 1996 года газопоршневые установки находятся в постоянной коммерческой эксплуатации, и по состоянию на 12/2004 наработка каждого двигателя превысила 70 000 рабочих часов.

Металлургическая отрасль: коксовый, доменный, конверторный и ферросплавный газы

При существующей технологии выплавки стали, на каждом технологическом процессе выделяются низкокалорийные газы, которые могут быть использованы в качестве топлива в газопоршневых двигателях. На рисунке №17 показаны основные технологические процессы и количество выделяемых газов на каждом этапе при выплавке 1 тонны стали.

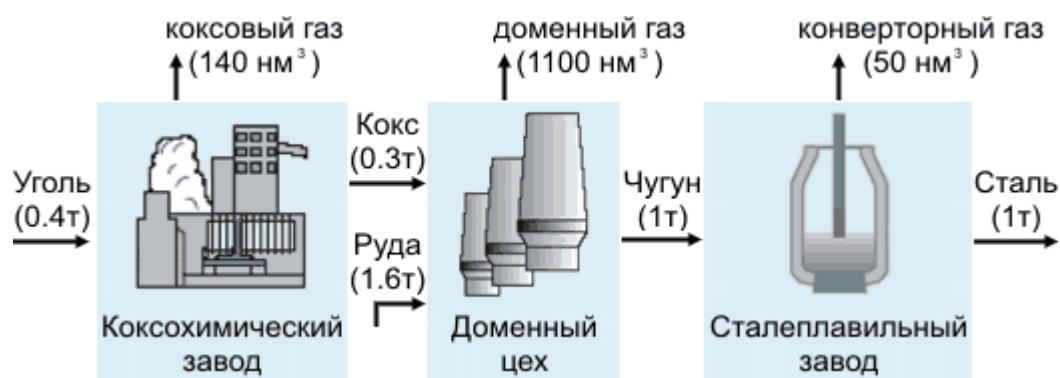
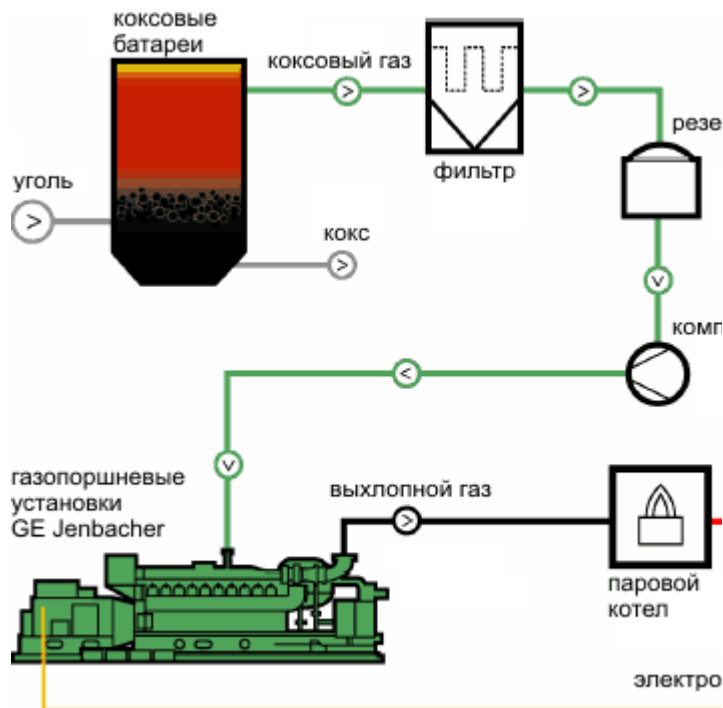


Рисунок №17. Выделение промышленных газов при выплавке 1 тонны стали

Коксовый газ: завод *Profusa SA*, Испания

Как побочный продукт при производстве кокса на заводе *Profusa SA* в *Bilbao* (Испания) образуется коксовый газ с высоким содержанием водорода. С августа 1995 года коксовый газ сжигается в 12 газовых двигателях *GE Jenbacher*, которые производят 7 164 кВт электрической мощности. Выхлопной газ используется для производства пара на технологические нужды.

По заказу завода, двигатели были адаптированы для работы на 100% коксового газа, 100% природного газа или смеси коксового/природного газа (60%/40%). Схема получения и сжигания газа показаны на рисунке №18, машинный зал с двигателями на рисунке №19.



**Profusa,
Испания**

Состав газа:

H_2	55%
CH_4	30%
CO	5%
CO_2	5%
N_2	5%
LHV	4132 ккал/нм ³

Рисунок №18. Схема утилизации коксового газа на заводе Profusa, Испания



**Profusa,
Испания**

12xJMS-316 GS S.L

Электрич. мощность:
12 x 597 кВт

Ввод в эксплуатацию:
август 1995 года

Наработка на 12/2004:
более 70 000 р.ч.
(каждым модулем)

Рисунок №19. Машинный зал электростанции на заводе Profusa, Испания

Уровень выбросов окислов азота NO_x при работе на коксовом газе и на смеси газов обеспечивается ниже 300 мг/нм³, при работе на природном газе – ниже 500 мг/нм³. С момента пуска-наладки в августа 1995 года газопоршневые установки находятся в постоянной коммерческой эксплуатации, и по состоянию на 12/2004 наработка каждого двигателя превысила 70 000 рабочих часов.

Коксовый газ: завод *Industrial Química del Nalón, S.A* в *Sama de Langreo*, Испания

Аналогичный проект утилизации коксового газа с содержанием водорода H_2 до 70% реализован на заводе *Sama*, на котором было установлено 2 двигателя *JMS-620* с общей

электрической мощностью 3 МВт. Двигатели также адаптированы для работы как на коксовом газе, на и на смеси в любой пропорции с природным газом, при этом переход на другой состав газа может производиться без остановки двигателя. Установки находятся в коммерческой эксплуатации более 20 000 рабочих часов (по состоянию на 12/2004).

Конверторный газ, завод Aceralia, Испания

Газовые двигатели GE Jenbacher были предложены металлургическому заводу в Aceralia, Испания для утилизации конверторного газа, получаемого при выплавке стали. В октябре 2003 года 1 тестовый двигатель был установлен для получения первичного опыта работы на таком газе. В процессе испытаний для работы на таком газе была адаптирована камера сгорания (форма поршней, степень сжатия) и настройки турбокомпрессора для достижения максимальной эффективности. Помимо этого, были предприняты дополнительные меры безопасности для исключения отравления токсическим угарным газом (CO), который собственно и является основным горючим компонентом.

После 3000 р.ч. опытной эксплуатации тестового двигателя, металлургический завод принял решение о закупке дополнительных 11 модулей JMS-620. Общая электрическая мощность электростанции составляет 20,4 МВт эл, на рисунках 20,21 изображена электростанция и машинный зал.

Конверторный газ состоит в основном из CO (>60% об.) и небольшого количества водорода, остальное – инертные газы (N₂ и CO₂). LD (Linz Donawitz) процесс выплавки стали осуществляется путем подачи кислорода в расплав чугуна, при этом углерод из чугуна окисляется кислородом превращаясь в CO, который после очистки и охлаждения может использоваться в газопоршневых двигателях.



**Aceralia,
Испания**

Состав газа:

H ₂	1%
CO	60÷75%
CO ₂	14%
N ₂	13%
LHV	573 ккал/нм ³

Рисунок №20. Электростанция на конверторном газе завода Aceralia



**Aceralia,
Испания**

12xJMS-620 GS S.L

**Электрич. мощность:
12 x 1 558 кВт**

**Тепловая мощность:
12 x 1 012 кВт**

**Ввод в
эксплуатацию:
сентябрь 2004 года**

**Наработка на 01/2006:
более 12 000 р.ч.
(каждым модулем)**

Рисунок №21. Машинный зал электростанции на заводе Aceralia

По заказу завода, три из 12 модулей оборудованы дополнительным газовым трактом для сжигания природного газа в случае дефицита конверторного газа. Газопоршневые установки были сданы в эксплуатацию в сентябре 2004 года, и в январе 2006 года коммерческая эксплуатация превысила 12 000 рабочих часов. После успешной эксплуатации в 2006 году было принято решение о приобретении дополнительных 2-х модулей JMS-620.

Пиролизный газ: пиролизный завод в Fondotoce, Италия

С помощью технологии высокотемпературного пиролиза имеется возможность утилизации широкого спектра органического сырья, например бытовых и промышленных отходов, осадка сточных вод, измельченных опилок и т.п. Технологическая цепочка включает измельчение отходов, их уплотнение, откачку воздуха, дегазацию при температуре более 600°C и последующую газификацию с помощью чистого кислорода. Завод функционирует исключительно автономно, обеспечивая полностью свои энергетические нужды с помощью пиролизного газа.

Получаемый в высокотемпературном реакторе синтетический газ, после шокового охлаждения и очистки в газопоршневые установки, которые вырабатывают электрическую энергию. Газовая электростанция в Fondotoce (Италия) была запущена в эксплуатацию в 1993 году.



Mutsu, Япония

2xJGS-616 GS SN.L

*Электрич. мощность:
2 x 1 200 кВт*

Состав газа:

<i>H₂</i>	<i>20÷40%</i>
<i>CO</i>	<i>34÷40%</i>
<i>CO₂</i>	<i>25÷35%</i>
<i>N₂</i>	<i>2÷5%</i>
<i>LHV</i>	<i>>1719 ккал/нм³</i>

*Ввод в
эксплуатацию:
февраль 2003 года*

*Наработка на
10/2005:
более 19 000 р.ч.*

Рисунок №22. Электростанция на пиролизном газе в Mutsu, Япония

Аналогичные проекты были реализованы в г. Chiba (2001 год) и в г. Mutsu (февраль 2003), Япония. На рисунке №22 показан машинный зал электростанции на пиролизном газе в г. Mutsu (2xJGS-616 электрической мощностью 2x1.2 МВт), с момента сдачи в эксплуатацию (февраль 2003) по октябрь 2005 время успешной коммерческой эксплуатации превысило 19 000 рабочих часов.

Газификация древесных отходов: Harboore

В 1988 году компания Babcock & Wilcox Volund Aps начала разработку установки газификации отходов с такими показателями:

- **получение непрерывного потока и стабильного состава газа;**
- **возможность газификации сырья с влажностью до 50%;**
- **производство газа для двигателей внутреннего сгорания;**
- **высокая степень автоматизации процессов.**

Был построен газификатор вертикального типа, имеющий встроенную зону осушения газа. Основным преимуществом такой компоновки является возможность использования очень влажного сырья, простота, встроенный теплообменник обеспечивает низкую температуру уходящего газа и высокую эффективность газификации. Недостатком конструкции является её громоздкость.

После нескольких лет работ по разработке и усовершенствованию конструкции газификатора, первый завод по такой технологии газификации древесных отходов был запущен в Дании на отопительной коммунальной котельной Harboore.

Основным сырьем для газификации служит древесная щепа, также может использоваться древесные обрезки, кора и др. органика. В течении лета 1996г. была начата коммерческая эксплуатация газификатора и работы были сконцентрированы на очистке синтетического газа. Была установлена комплексная система обработки газа, включающая скрубберы, теплообменники и электростатические фильтры перед подачей газа в газопоршневые установки. Такая система очистки вызвана наличием большого количества смолы и пыли в газе.

С начала 2000 года были запущены 2 газопоршневые установки GE Jenbacher JMS-320, работающие на продуктах газификации древесных отходов. Каждый модуль имеет электрическую мощность 765 кВт и 983 кВт тепловой мощности. Общий КПД преобразования энергии газа превышает 90%. Благодаря работе с большим коэффициентом избытка воздуха ($\lambda=1.6$) достигается низкий уровень выбросов NOx.

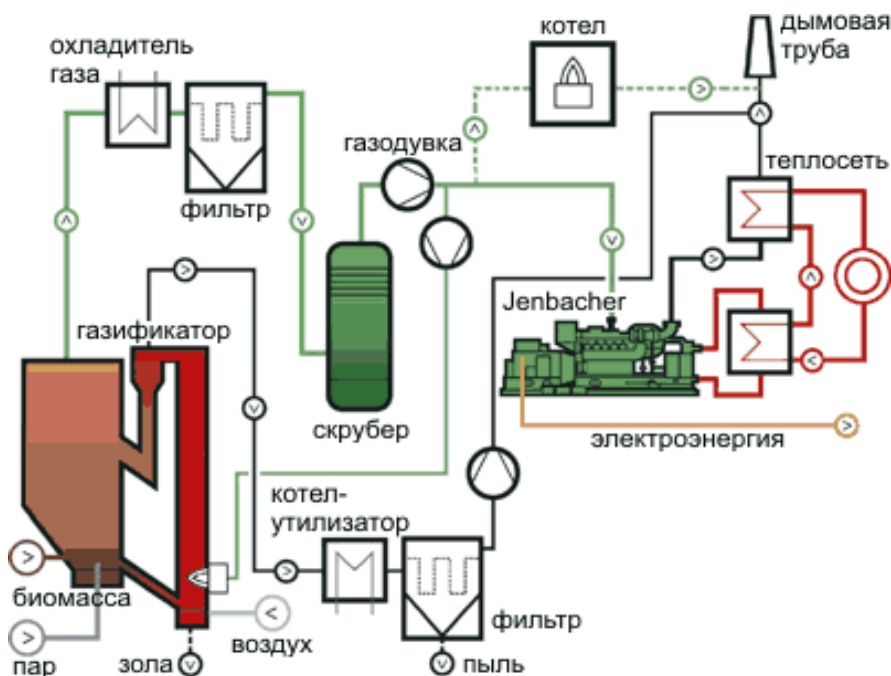
К концу 2005 года наработка каждого двигателя превысила 28 000 рабочих часов. Частые проверки состояния камеры сгорания показали отсутствие смоляных отложений.

Завод по газификации древесных отходов в кипящем слое в Gussing, Австрия

Для возможности газификации биомассы в небольших, децентрализованных тепловых станциях, ученые из Венского Технологического Университета и теплоснабжающая компания г. Gussing разработали и построили завод по газификации биомассы в кипящем слое. На рисунке №23 показана схема завода по газификации биомассы, на рисунке №24 газификатор и здание машинного зала с газопоршневыми двигателями GE Jenbacher. Завод обеспечивает производство 4,5 МВт тепловой мощности для централизованного теплоснабжения и 2,0 МВт электрической мощности из перерабатываемых 1760 кг/ч древесных отходов.

Серцем завода является паровой газификатор в кипящем слое. В процессе газификации биомасса нагревается до температуры 850°C при подаче пара. Использование пара вместо воздуха обеспечивает отсутствие азота и смоляных примесей в пиролизном газе и его относительно высокую теплотворную способность. Частицы остающегося угля попадают в камеру сгорания через кипящий слой, что позволяет получить дополнительное тепло. Полученный газ отделяется и охлаждается, отдавая тепло в систему теплоснабжения.

От пыли газ очищается тканевым фильтром, а далее в скрубберах он дополнительно очищается от смол, аммиака и кислотных компонентов.



Gussing,
Австрия

Состав газа:

H ₂	40%
CO	24%
CH ₄	10%
CO ₂	23%
N ₂	3%
LHV	2615 ккал/нм ³

Рисунок №23. Технология газификации древесины в Gussing, Австрия



**Gussing,
Австрия**

1xJMS-620 GS S.L

**Электрич. мощность:
1 964 кВт**

**Тепловая мощность:
2 490 кВт**

**Ввод в эксплуатацию:
февраль 2002 года**

**Наработка на 12/2005:
более 20 000 р.ч.
(каждым модулем)**

Рисунок №24. Газификатор древесных отходов в кипящем слое в Gussing, Австрия

Тем не менее, в газе после очистки остается до 440 мг/нм³ аммиака (NH₃). Этот вредный компонент, окисляясь в камере сгорания, не только вызывает резкое увеличение выбросов окислов азота, но и может сокращать срок службы масла и деталей камеры сгорания. На данный момент не выявлено развития опасных тенденций при такой концентрации аммиака в топливном газе, тем не менее, ведутся успешные опыты по добавке специальных агентов в воду, подаваемую в скрубберы для очистки газа, с целью связывания аммиака.

Благодаря полной утилизации тепловой энергии, газопоршневые двигатели обеспечивают общий КПД преобразования энергии топлива выше 85%.

Выводы

Утилизация крайне низкокалорийных газов с большим содержанием водорода бросает серьезные вызовы производителям газопоршневых двигателей.

Накопленный опыт эксплуатации газовых двигателей GE Jenbacher на таких объектах, как «Profusa», «Krems Chemie» (более 70 тысяч рабочих часов) показывает, что широкий спектр низкокалорийных газов может быть эффективно утилизирован в газовых двигателях. Основным критерием, определяющим возможность утилизации того или иного газа является ламинарная скорость пламени, а не теплота сгорания.

Инсталляция в «Krems Chemie» показывает, что даже газ с теплотой сгорания 398 ккал/нм³ (или 4,9% от теплоты сгорания природного газа) может использоваться в газопоршневых двигателях.

Важным критерием, определяющим возможность утилизации продуктов пиролиза, является их степень загрязнения смолами и пылью. В некоторых случаях может понадобится комплексная система очистки газа (скрубберы, электростатические фильтры).

Во всех этих применениях возможно достижение нормативных показателей (для Европы) по выбросам NO_x на уровне TA-LUFT (500 мг/нм³) без применения систем последующей очистки газа (катализаторов) только с помощью концепции сжигания бедной смеси. При содержании водорода (H₂) в газе более 50% (энергетических), возможно достижение крайне низких выбросов окислов азота на границе их выявляемости (ниже 10 ppт или 4 мг/нм³).

При работе на газе с высоким содержанием водорода (H₂) может быть обеспечен очень высокий электрический КПД (в среднем на 2% выше, чем при работе на природном газе), однако при наличии большого количества инертных компонентов возможно снижение мощности из-за дефицита располагаемой энергии на входе в турбокомпрессор. При утилизации конверторных газов и других газов с высоким содержанием CO для достижения нормативных показателей по уровню содержания CO в выхлопных газах (TA LUFT: <650 мг/м³) требуется установка каталитических (окислительных) катализаторов.